Abschlussbericht "Towards a holistic quality assessment for guided wave-based SHM"

Prof. Dr.-Ing. Inka Mueller

23.10.2025

1 Allgemeine Angaben

DFG Geschäftszeichen	MU 4402/1-1
Projektnummer	MU 4402/1-1
Titel des Projekts	Towards a holistic quality assessment for guided wave-based SHM
Name der Antragsstellenden	Inka Mueller
Dienstanschrift	Hochschule Bochum Am Hochschulcampus 1 44801 Bochum

Publikationsliste: Publikationen mit wissenschaftlicher Qualitätssicherung

Bayoumi, A., Savli, E., Mueller, I., Tschöke, K., Memmolo, V., & Moll, J. (2024). Reliability Assessment of Damage Localization Techniques for Guided Wave-based Structural Health Monitoring Systems in Composite Stiffened Structures. *Proceedings of EWSHM2024*, *29*(7). https://doi.org/10.58286/29762

Memmolo, V., Moll, J., Moix-Bonet, M., Lugovtsova, Y., Schmidt, D., Krozer, V., & Mueller, I. (2024). Towards reliability assessment of ultra-wideband microwave leakage monitoring in detecting stringer debondings in composite airframes. *Proceedings of EWSHM2024*, *29*(7). https://doi.org/10.58286/29749

Memmolo, V., Moll, J., Schackmann, O., Freitag, S., Volvikova, A., Tschöke, K., Savli, E., Lugovtsova, Y., Moix-Bonet, M., Bayoumi, A., & Mueller, I. (2023). Promoting novel strategies for the reliability assessment of guided wave based SHM systems. *Proceedings of IWSHM2023*.

Mueller, I., Freitag, S., Memmolo, V., Moix-Bonet, M., Möllenhoff, K., Golub, M., Venkat, R. S., Lugovtsova, Y., Eremin, A., Moll, J., & Tschöke, K. (2022, Juni). Performance Assessment for Artificial Intelligence-Based Data Analysis in Ultrasonic Guided Wave-Based Inspection: A Comparison to Classic Path-Based Probability of Detection. In *European Workshop on Structural Health Monitoring* (S. 953–961). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-07258-1_96

Mueller, I., Memmolo, V., Bayoumi, A., Refae, M., & Ricci, F. (2025). Hybrid SHM Sensor Network Feeding Multiple SHM Systems for Monitoring Plate-Like Structures Under Cyclic Fatigue: First Results of a Dataset Under Construction. *International Workshop of Structural Health Monitoring 2025*.

Mueller, I., Memmolo, V., Tschöke, K., Moix-Bonet, M., Möllenhoff, K., Golub, M., Venkat, R. S., Lugovtsova, Y., Eremin, A., & Moll, J. (2022). Performance Assessment for a Guided Wave-Based SHM System Applied to a Stiffened Composite Structure. *Sensors*, *22*(19), 7529. https://doi.org/10.3390/s22197529

Tschoeke, K., Mueller, I., Memmolo, V., Moix-Bonet, M., Moll, J., Lugovtsova, Y., Golub, M., Venkat, R. S., & Schubert, L. (2021). Feasibility of Model-Assisted Probability of Detection Principles for Structural Health Monitoring Systems based on Guided Waves for Fibre-Reinforced Composites. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 1–1. https://doi.org/10.1109/tuffc.2021.3084898

Tschöke, K., Mueller, I., Memmolo, V., Venkat, R. S., Golub, M., Eremin, A., Moix-Bonet, M., Möllenhoff, K., Lugovtsova, Y., Moll, J., & Freitag, S. (2022, Juni). A Model-Assisted Case Study Using Data from Open Guided Waves to Evaluate the Performance of Guided Wave-Based Structural Health Monitoring Systems. In *European Workshop on Structural Health Monitoring* (S. 937–944). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-07258-1_94

Volovikova, A., Freitag, S., Schackmann, O., Memmolo, V., Bayoumi, A., Mueller, I., & Moll, J. (2024). Artificial Intelligence-Based Approach for Damage Localization in Ultrasonic Guided Wave-Based Structural Health Monitoring. *Research and Review Journal of Nondestructive Testing*, *2*(2). https://doi.org/10.58286/30490

Volvikova, A., Freitag, S., Schackmann, O., Memmolo, V., Bayoumi, A., Mueller, I., & Moll, J. (2024). Artificial Intelligence-Based Approach for Damage Localisation in Ultrasonic Guided Wave-Based Structural Health Monitoring. *Proceedings of EWSHM2024*.

2 Arbeits- und Ergebnisbericht

Das in 2018 beantragte Vorhaben sollte als wissenschaftliches Netzwerk NachwuchswissenschafterInnen die Möglichkeit zum ortsübergreifenden themen- und aufgabenbezogenen Austausch eröffnen. Ziel des Vorhabens war es, durch den Austausch ein gemeinsames Verständnis für die aktuellen Probleme in der ganzheitlichen Gütebestimmung von SHM-Systemen basierend auf geführten Wellen zu entwickeln. Darauf basierend sollten gemeinsam Lösungsansätze erforscht, diskutiert und publiziert werden, um diese als Grundlage für mögliche zu beantragende Forschungsprojekte auszuarbeiten.

Über die Laufzeit des Projektes haben etliche Randbedingungen dazu beigetragen, dass sich insbesondere die Art der Projektgestaltung angepasst hat. Zu diesen Randbedingungen zählen insbesondere die Corona-Pandemie, die kurz nach Beginn des Projektes begann - für ein Projekt, dessen Hauptziel die Übernahme von Reisekosten für Treffen in Person ist, eine riesige Herausforderung - sowie die Familiengründung bei einigen Mitgliedern des Netzwerkes und der Beginn des Konflikts zwischen Russland und der Ukraine.

Dies vorangestellt, beschreibt der Bericht den Verlauf und den Output dieses wissenschaftlichen Netzwerkes für NachwuchswissenschafterInnen im Bereich Structural Health Monitoring (SHM) mit geführten Wellen. In 2.1 werden personelle Aspekte des Netzwerks aufgeführt. In 2.2 werden die einzelnen Treffen des gesamten Netzwerks, die stattgefunden haben, kurz dargestellt inkl. einer Auflistung der eingeladenen Experten. In 2.3 werfen wir einen Blick auf die erreichten Ergebnisse und diskutieren diese im Hinblick auf den aktuellen Forschungsstand und mögliche Folgeuntersuchungen.

2.1 Mitgliederentwicklung

Die Mitglieder des Netzes haben sich im Laufe der Zeit leicht angepasst, um die Projektziele zu erreichen. Etliche Mitglieder haben im Zeitraum der Förderung beachtliche berufliche Weiterentwicklungen vorzuweisen, Mitglieder, Zeiten und Weiterentwicklung sind in Tabelle 2.1 dargestellt.

Name	Zeitraum	wissenschaftliche Weiterentwicklung
Steffen Freitag	2020-2025	Professur KIT in 2021
Mikhail Golub (RU)	2020-2022	
Yevgeniya Lugovtsova	2020-2024	Promotion in 2022
Vittorio Memmolo (IT)	2020-2025	Assistant Professor an der Università degli Studi di Napoli Federico II seit 2023
Maria Moix-Bonet	2020-2025	unbefristete Stelle als Wissenschaftlerin am DLR
Jochen Moll	2020-2025	Wechsel an die Universität Siegen
Kathrin Möllenhoff	2020-2025	Assistant Professor Eindhoven University of Technology in 2020 Juniorprofessur Heinrich Heine Universität Düsseldorf in 2021 Professur Universität zu Köln seit 2023
Inka Mueller	2020-2025	Promotionsrecht im PKNRW und an der Universität Siegen
Kilian Tschöke	2020-2025	Promotion in 2020 abgeschlossen Teamleitung am IKTS FhG seit 2022
Ramanan Srideran Venkat	2020-2022	

Tabelle 2.1: Mitglieder des Netzwerks

Sicherlich sind die hier gelisteten Erfolge nur zu einem kleinen Teil auf die Förderung durch das wissenschaftliche Netzwerk zurückzuführen. Allein die Auflistung zeigt jedoch, dass das Netzwerk personell etliche positive Entwicklungen zu bieten hat. Ergänzend sei darauf hingewiesen, dass das Netzwerk seit 2022 geschlechterparitätisch besetzt ist, etwas, das sich ganz selbstverständlich ergeben hat und zeigt, dass in diesem Gebiet erfolgreiche Frauen vertreten sind, wenn man sie den sehen möchte.

Über die offiziellen Mitglieder hinaus wurden in der späteren Phase des Projektes etliche MitarbeiterInnen und DoktorandInnen eingebunden, um den Netzwerkgedanken weiter zu stärken. Insbesondere seien hier die folgenden Personen (alphabetisch) genannt:

– Ahmed Bayoumi, DLR, früher HS Bochum

- Mariam Refae, HS Bochum
- Fabrizio Ricci, Univ. Neaples
- Enes Savli, FhG IKTS
- Oliver Schackmann, Goethe Universität Frankfurt
- Anastasiia Volovikova, KIT

Bis auf Fabrizio Ricci sind all die gelisteten Personen sind NachwuchswissenschaftlerInnen (zwei Frauen, drei Männer), die im Rahmen des Projektes vernetzt wurden. Der Grundgedanke des Projektes und des Förderformates konnte durch ihre Einbindung weiter gestärkt werden.

2.2 Organisatorischer Rahmen

Folgende Haupttreffen haben die Mitglieder des Netzwerks absolviert:

- 27.-28.1.2020 in Berlin
- 21-23.9.2020 in Bochum
- 4.-5.3.2021 online
- 13.-15.9.2021 in Frankfurt
- 12.-13.6.2023 in Braunschweig
- 22.2.-1.3.2025 in Neapel

Folgende ExpertInnen und Gäste waren in ausgewählten Sitzungen mit dabei (größtenteils durch Mittel aus dem Projekt finanziert):

- Marija Bertovic
- Sebastian Thöns
- Daniel Kanzler
- Artiom Eremin
- Alexander Mendler

- Beata Zima
- Francesco Falcetelli
- Ferda Gul

Darüber hinaus haben etliche Treffen von Kleingruppen zur Abstimmung und Durchführung gemeinsamer Arbeiten, zur Diskussion gemeinsamer Veröffentlichungen etc. stattgefunden. Diese auszuzählen erscheint müßig. Es sei darauf hingewiesen, dass aufgrund der Pandemie-Situation entgegen der ursprünglichen Planung keine Austausche von Studierenden im Rahmen von Abschlussarbeiten durchgeführt wurden. Wohl aber konnten die integrierten Studierenden O. Schackmann und M. Refae zu mehreren Gelegenheiten ihre Arbeiten vorstellen und selbst reisen. Einen wesentlichen Anteil haben auch einzelne Besuche von Personen im Netzwerk zu anderen PartnerInnen im Netzwerk ausgemacht. Ziel dieser Besuche war, gemeinsam Versuche durchzuführen und darauf basierend neue Analysemethoden testen zu können. In fast allen Fällen münden die Ergebnisse in eine Publikation ein.

2.3 Output

Finden einer gemeinsamen Sprache und erste gemeinsame Arbeiten

Ziel des ersten Treffens in Berlin war die Vernetzung der zu großen Teilen untereinander bislang unbekannten Personen aus dem Bereich SHM und das Einschwören auf den Themenkomplex POD für SHM im Rahmen des Netzwerks. Die Expert:innen Marija Bertovic und Sebastian Thöns gaben der Gruppe Input einerseits in den Themenbereich der Einflussfaktoren, die gern vergessen werden - Fokus menschliche Faktoren für NDT, andererseits in den Themenbereich Value of Information (VOI). Die Diskussion zeigte, dass beide Bereiche wesentlich sind, ersterer für die Entwicklung einer geeigneten Methodik, zweiterer für das Mitdenken im Ziel von POD für SHM basierend auf geführten Wellen. Denn ohne verlässliche POD ist eine Analyse des VOI nicht vorstellbar, gleichzeitig definiert VOI bestimmte Anforderungen auf den Output einer POD Analyse. Das gemeinsam erarbeitete Verständnis des aktuellen Stands der Technik und den damit verbundenen Herausforderungen sowie potentiellen Herangehensweisen konnten die Teilnehmenden noch nicht zu einem Gesamtpuzzle zusammenfügen, jedoch einen signifikanten Mehrwert für die Diskussion und Analyse von frischen Forschungsergebnissen der Arbeitsgruppe um Lars Schubert und Kilian Tschöke am Fraunhofer IKTS bieten. Daraus entstand die gemeinsame Veröffentlichung Tschoeke et al., 2021, in der simulationsbasierte Ergebnisse im Detail analysiert werden. Einig waren sich die Mitglieder, dass

für die Erarbeitung potentieller Lösungen eine Verstärkung des Netzwerks in den Bereichen KI und Statistik mit kleinen Zahlen vorteilhaft wäre. Für diese Personen wurde der erarbeitete Stand gemeinsam aufbereitet.

Gemeinsame Lösungsansätze

Im zweiten Treffen stand der Fokus darauf, die neuen Mitglieder fachlich zu integrieren. Mit Steffen Freitag fand ein Experte für KI und deren Anwendung in den Ingenieurwissenschaften, mit Kathrin Möllenhoff eine Expertin im Bereich medizinische Statistik mit kleinen Zahlen Eingang ins Netzwerk. Beiden waren die Themen rund um SHM, geführte Wellen und POD bislang unbekannt. In beiden konnten wir aber höchst engagierte Personen finden, die über die Jahre fest mit dem Netzwerk verbunden sind. Darüber hinaus hatte das erste Treffen gezeigt, dass der Ursprung des POD im Bereich NDT wesentlich für ein tiefgreifendes Verständnis ist, sodass Daniel Kanzler als Experte angefragt wurde. Dieser reiste auf eigene Kosten an, da seine Nähe zur Wissenschaft nicht aus seinen vertraglichen Abhängigkeiten beschrieben werden kann. Geprägt von seinem Impulsvortrag und der anschließenden Diskussion wurde deutlich, an welchen Stellen die Ansätze von POD für SHM nicht anwendbar sind. Hierfür wurden im Anschluss in Kleingruppen erste Lösungsoptionen diskutiert.

Die Ergebnisse dieses zweiten Treffens mündeten in die Veröffentlichungen, die als gemeinsames Verständnis in einem Journalbeitrag Mueller, Memmolo et al., 2022 und im Rahmen der wichtigsten Konferenz im Bereich SHM, der IWSHM, Memmolo et al., 2023 publiziert wurden.

In Abbildung 2.1 zeigt sich sehr gut, in welch großem Maße die verschiedenen Schritte in der Entwicklung von SHM-Systemen mit dem Thema POD und ROC verbunden sind, da sich der komplette Block Design und Data Analytics wechselseitig mit POD bedingt. Schlussendlich wird es nicht zielführend sein, POD nur als *Endabnahme* in die Entwicklung von SHM-Systemen einzubeziehen. Vielmehr ist es notwendig, POD zu etablieren, um Design und Data Analytics optimal - oder zumindest deutlich verbessert - auslegen zu können. Prinzipiell ist es möglich, hier auch das VOI Konzept zu nutzen - dies ermöglicht eine stärkere Einbindung der Kosten als Zielfunktion, jedoch sind hierfür POD-Informationen unabdingbar.

Für das weitere Vorgehen einigte man sich auf Open Guided Wave Dataset 2 als Testdaten, Moll et al., 2020.

In den nachfolgenden Treffen standen immer mehrere Themenkomplexe zur Diskussion. Die eingeladenen ExpertInnen haben dabei mit einzelnen Schwerpunkten die Diskussionen bereichert. Im dritten Treffen, dass aufgrund von Corona nur Online stattgefunden

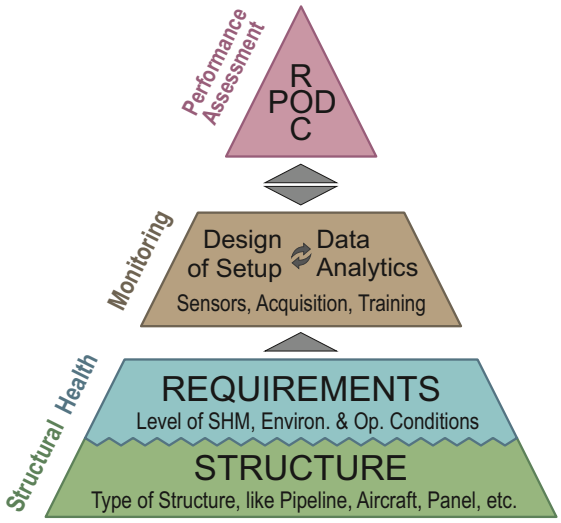

Abbildung 2.1: Performance Assessment Pyramide

hat, war die Diskussion mit Artiom Eremin für den Schwerpunkt Numerische Simulation und POD bereichernd. In Frankfurt konnten wir interessante Ansätze aus dem Bauwesen von Alexander Mendler und Beata Zima kennenlernen. In Braunschweig gab es mit Fancesco Falcetelli einen Experten für POD-Analysen für faseroptische Verfahren. Aus den Diskussionen wurde deutlich, dass hier große Unterschiede bestehen, aber hybride Systeme von beidem profitieren könnten - ein weiterer Baustein für die schlussendlich in Neapel durchgeführte Messkampagne, in die auch Anregungen von Ferda Gul, die selbst Schwingversuche mit geführten Wellen zur Überwachung des Schadensfortschritts durchgeführt hat, eingeflossen sind.

Im Folgenden werden einzelne Aspekte, die im Netzwerk bearbeitet wurden, schlaglichtartig inhaltlich beleuchtet.

2.3.1 AI für POD und darüber hinaus

Eine Möglichkeit, Informationen zu erreichen, die mit POD-Ergebnissen vergleichbar sind, ist es, AI-Methoden zu nutzen, um abzuschätzen, welche Schadensgröße sicher erkannt werden kann. Erste Ansätze und ein Vergleich zu den im Bereich NDT etablierten Methoden sind in Mueller, Freitag et al., 2022 dargestellt. Darauf aufbauend wurden etliche weitere Analysen durchgeführt. Die besten Ergebnisse wurden im Rahmen der EWSHM 2024 präsentiert. Als Erfolg darf hier gewertet werden, dass der Konferenzbei-

trag Volvikova et al., 2024 zu den 11 besten Papern von Nachwuchswissenschafter:innen ausgewählt wurde. Wir durften daher eine Extended Version des Beitrags im Research and Review Journal of NDT einreichen, die hier veröffentlicht ist:Volovikova et al., 2024.

Neben der Tatsache, dass bewiesen werden konnte, dass die Datenmenge von drei Testschäden ausreichend ist, wenn die Merkmale sinnvoll gewählt werden und damit jeder Pfad einen eigenen Input für alle drei Testschäden liefert, konnte im Projekt gezeigt werden, dass mittels AI auch alternative Schadensdetektionsmethoden möglich sind. Dies soll im beantragten und inzwischen genehmigten DFG Sachbeihilfeprojekt unter der Projektnummer 566880366 von den Mitgliedern Freitag und Moll unter Kooperation mit dem Mitglied Memmolo weiter untersucht werden.

2.3.2 Numerische Modellierung als Grundlage für POD

Ein Ergebnis der Diskussionen des Netzwerks ist, dass es etliche Anwendungsfälle gibt, in denen die Analyse der POD auf Basis von experimentellen Daten nicht umsetzbar ist. Gründe dafür können sein:

- zu großer technischer/finanzieller Aufwand (gleichartige Strukturen herzustellen und gezielt zu zerstören - z.B. Brücken)
- fehlende Übertragbarkeit (Nutzung von Ergebnissen im Modellmaßstab oft nicht möglich)
- Curse of Dimensionality (zu viele Proben müssten geprüft werden)

Bereits in Tschoeke et al., 2021 wird auf Aspekte der numerischen Modellierung eingegangen. In diesem Datensatz steht aber keine experimentelle Validierung zur Verfügung. Darauf basierend hat das Netzwerk etliche numerische Simulationen zu dem bestehenden Datensatz aus Moll et al., 2020 aufgesetzt und durchgeführt. Es zeigt sich, dass bestehende Modelle noch Abweichungen zu experimentellen Daten aufweisen, aber schon in 2022 durchaus in der Lage waren, für Teilprobleme nicht nur die Grundlage von grundsätzlichen POD-Analysen zu bilden, sondern auch Phänomene zu erklären, die aus den vorliegenden experimentellen Daten nicht gleich ersichtlich sind. Dies ist in Tschöke et al., 2022 im Detail dargestellt worden.

2.3.3 Statistische Abhängigkeit der Daten

Die Lösung für diese Problematik steht in starkem Zusammenhang mit dem vorangehenden Punkt. Nimmt man die Problematik ernst, so bedeutet es, dass jede experimentelle Probe nur ein Mal genutzt werden darf, und zwar für einen Schadensort und

eine Schadensgröße. Alternative Herangehensweisen wie Length at detection (LaD) nutzen ebenfalls aus einem gesamten Datensatz nur ein Merkmal - das in diesem Fall aus den experimentellen Daten mehrerer Schadensgrößen elaboriert wird. Die Diskussion im Netzwerk und darüber hinaus zeigt aber, dass die statistische Abhängigkeit der Daten dann toleriert werden kann, wenn es sich um das eigentliche System handelt, das untersucht werden soll. Dies kann folgerichtig nur der Fall sein, wenn das System noch im ungeschädigten Zustand ist, da es sich sonst ja nicht um das identische System handeln kann. Im Rahmen des EU-geförderten Projekts GW4SHM arbeitet die AG Mueller mit dem Doktoranden Ahmed Bayoumi parallel für eine andere Applikation nur zu diesem Thema und es erfolgt ein steter Austausch mit dem Netzwerk. Ergebnisse hierzu sind beispielsweise in Bayoumi et al., 2023 dargestellt und die daraus entstandene Dissertation wird aller Voraussicht nach im Dezember 2025 verteidigt. Im Rahmen des Netzwerks erfolgten hier zahlreiche Diskussionen, die nicht in einer eigenen Veröffentlichung zur Thematik mündeten, sondern Eingang in fast alle genannten Veröffentlichungen des Netzwerks fanden.

2.3.4 POD Techniken für Lokalisierung

Eine Herausforderung, die sich direkt an die Bestimmung der eigentlichen POD anschließt, ergibt sich, wenn man sich die Level des SHM anschaut. Beginnend mit Level 1 - Detektion, geht es weiter mit Level 2 - Lokalisation, Level 3 - Art/Größe des Schadens und Level 4 - Restlebensdauer. Für SHM auf Basis von geführten Wellen sind die ersten drei Level häufig im Fokus. Im Rahmen des Netzwerkes wurden daher Ideen zur Generierung einer probability of localization, also einer Angabe, ab welcher Schadensgröße die Lokalisation mit einer definierten Genauigkeit erfolgen kann, weiterentwickelt. Die Ergebnisse hierzu sind in Bayoumi et al., 2024 dargestellt.

2.3.5 Application Ultra-wideband microwave leakage monitoring

Eine Thematik, die sich erst aus der gemeinsamen Arbeit im Netzwerk ergeben hat, ist die Frage, in wie weit sich die erarbeiteten Konzepte auf andere Schadensarten und andere SHM Methodiken anwenden lassen. Gefördert durch das Netzwerk konnte im Rahmen des Treffens in Braunschweig durch das große Engagement und die Bereitschaft, Equipment durch Europa mitzunehmen, eine eigene Messreihe zu Ultra-wideband microwave leakage monitoring durchgeführt werden, die die Bestimmung der POD zulässt. Es zeigt sich, dass die im Netzwerk erarbeiteten Problematiken, aber auch die Lösungsansätze für das hier betrachtete Verfahren in ähnlicher Weise Anwendung finden können. Die ausgewerteten Daten sind in Memmolo et al., 2024 ausführlicher erläutert.

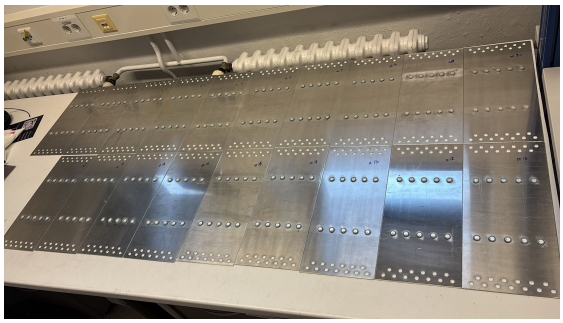

Abbildung 2.2: Proben, mit GW-System ausgestattet

2.3.6 Hybrides SHM und Hybrides POD

Die Diskussionen führten dazu, dass festgestellt wurde, dass man für eine Applikation aller im Netzwerk generierten Ideen keinen passenden Datensatz zur Verfügung hat. Aus diesem Grund wurde in Braunschweig vereinbart, alle noch zur Verfügung stehenden Mittel diesem Zweck zu widmen (und weitere Mittel in die Entstehung eines solchen Datensatzes zu investieren). Dieser Datensatz bildet die Grundlage von Untersuchungen, die als Proof of Concept für Folgeanträge genutzt werden sollen. 25 Proben wurden gefertigt und mit einem hybriden SHM System ausgestattet. Abbildung 2.2 zeigt die Aluminium Proben nach der Aufbringung des SHM Systems für geführte Wellen.

Nach Vorversuchen in Bochum erfolgte die Prüfung der ersten sieben Proben Ende Februar und Anfang März in Neapel durch ein Team von Mitgliedern des Netzwerks. Leider konnte die gesamte Messreihe noch nicht abgeschlossen werden, da das Labor in Italien massive Schäden durch ein Erdbeben erfuhr. Die Beteiligten planen aber, die Messreihe noch abzuschließen, das Labor ist seit ein paar Wochen wieder in der Phase der Inbetriebnahme. Zum Zeitpunkt der Berichtserstellung ist die Aufnahme und Auswertung der Daten noch nicht abgeschlossen. Erste Ergebnisse finden sich aber im gemeinsamen Paper **Mueller2025**. Hier zeigt sich, dass die Ideen des Netzwerks an diesem Datensatz umsetzbar sind, sodass er eine ideale Grundlage für weitere Arbeiten und Anträge bildet.

2.4 Einordnung in den aktuellen Forschungsstand

Die im Netzwerk generierten Ideen haben in der wissenschaftlichen Gemeinde mittlere bis große Sichtbarkeit erlangt. Die kontinuierliche Veröffentlichung der Ergebnisse hat

dazu beigetragen, ebenso die Vorstellung im Rahmen von nationalen und internationalen Treffen von Verbänden und Interessensgruppen wie der DGZfP oder SAE AISC.

Während der Laufzeit des Projektes haben neue und etablierte Arbeitsgruppen ebenfalls das Thema POD weiter auf auf ihrer Agenda bearbeitet, wenngleich das Thema noch immer nicht die hohe Sichtbarkeit erlangt hat, die eigentlich aus Sicht des Netzwerks notwendig wäre. Durch die Zusammenarbeit mit Francesco Falcetelli, der sich der POD für andere faserbasierte SHM Systeme gewidmet hat, Falcetelli et al., 2021, ist ein erheblicher Mehrwert entstanden, den es nun gilt, weiter zu heben. In Knott et al., 2024 wird eine detaillierte Analyse des Themas statistische Abhängigkeit der Daten aufgezeigt. Die Lösung, die hier dargestellt wird, enthält aber noch immer die Annahme, dass ausreichend Proben experimenteller Art zur Verfügung stehen, deren Schadenswachstum (Risswachstum) in abhängigen Messungen mithilfe von SHM beobachtet wird. Die Ergebnisse sind daher aus Sicht des Netzwerks zu kurz gegriffen, bzw. decken nur einen Teilbereich der Problematik ab. Eine ehrliche Darstellung wird in Yilmaz et al., 2024 gegeben, wobei hier die gleichen Probleme auftreten, die auch das Netzwerk herausgearbeitet hat.

2.5 Gemeinsame Forschungsanträge und -arbeiten

Aus den Reihen des Netzwerks haben sich etliche Forschungsanträge ergeben, die gestellt wurden. Bereits genannt wurde das inzwischen bewilligte Projekt *Unschärfequantifizierung und -minimierung für Structural Health Monitoring auf Basis geführter Wellen und künstlicher neuronaler Netze*. Ebenfalls beantragt wurden Projekte zwischen der AG Moll und dem DLR (Moix-Bonet und inzwischen Bayoumi), zwischen BAM (ehemals Lugovtova) und AG Mueller sowie im Verbund bei der EU unter Beteiligung von Mueller, Memmolo, Tschöke BAM und Falcetelli (2x im Rahmen der Marie Curie Netzwerke, leider bisher ohne Erfolg aber mit sehr guten Ratings).

Was bislang jedoch nicht gelungen ist, ist einen Antrag oder ein Antragspaket zusammenzustellen, das alle beteiligten WissenschafterInnen involviert und so den im Netzwerk so wunderbar gelebten Spirit der vielen Puzzelteile für ein großes Bild weiterträgt. In etwas anderer Form wird der Gedanke jedoch derzeit im DIN Gremium NA 062-11-06 AA diskutiert. Hier steht ein Normungsvorhaben zur Diskussion, das sich intensiv mit der Thematik des Netzwerks auseinandersetzt. Auch hier wurden die Arbeiten des Netzwerks gelobt und die offenen Punkte bestätigt, auf denen Folgeprojekte aufbauen sollten.

3 Zusammenfassung und kritische Selbstreflektion

Ziel des Vorhabens war es, durch den Austausch ein gemeinsames Verständnis für die aktuellen Probleme in der ganzheitlichen Gütebestimmung von SHM-Systemen basierend auf geführten Wellen zu entwickeln. Darauf basierend sollten gemeinsam Lösungsansätze erforscht, diskutiert und publiziert werden, um diese als Grundlage für mögliche zu beantragende Forschungsprojekte auszuarbeiten. Dieses Ziel hat das Netzwerk erreicht. Es zeigt sich, dass wir mit einigen Ideen schon weiter waren, als es beispielsweise im Kreis der SAE AISC der Fall ist, aber weniger Geld in die Hand genommen haben, um die entsprechenden Messreihen umzusetzen. Immer wieder wurde der hohe wissenschaftliche Output (bei vergleichsweise niedriger Förderung) positiv hervorgehoben. Das Netzwerk hat in einer herausfordernden Zeit hervorragend wissenschaftlich gearbeitet, die Personen haben sich im Rahmen des Netzwerks und darüber hinaus sehr gut entwickelt. Die Schaffung von Rahmenbedingungen, die für alle Beteiligten förderlich sind, wie beispielsweise die Umsetzung hybrider Treffen und die kurzfristige Bereitstellung von Mitteln aus dem Netzwerk für Reisen, trägt auf selbstverständliche Art und Weise zur Gleichstellung bei.

Kritisch muss jedoch angemerkt werden, dass bislang nicht alle Mitglieder in die Antragstellung von Folgeprojekten eingebunden werden konnten und die Bewilligungsquote der Anträge besser sein könnte. Vielmehr haben sich die Mitglieder vornehmlich auf inhaltliche Themen gestürzt und forschungspolitische Zwänge vernachlässigt, was rückblickend vielleicht durch stärker vorgegebene Leitungsstrukturen besser umsetzbar gewesen wäre.

Literatur - Fremde und eigene Arbeiten

Bayoumi, A., Savli, E., Mueller, I., Tschöke, K., Memmolo, V., & Moll, J. (2024). Reliability Assessment of Damage Localization Techniques for Guided Wave-based Structural Health Monitoring Systems in Composite Stiffened Structures. *Proceedings of EWSHM2024*, *29*(7). https://doi.org/10.58286/29762

Bayoumi, A., Vogt, T., & Mueller, I. (2023). New approach for reliability assessment of guided wave-based structure health monitoring system on a pipe application. *8th International Workshop on Reliability of NDT/NDE*, *12491*, 41–51.

Falcetelli, F., Yue, N., Di Sante, R., & Zarouchas, D. (2021). Probability of detection, localization, and sizing: The evolution of reliability metrics in Structural Health Monitoring. *Structural Health Monitoring*, *21*(6), 2990–3017. https://doi.org/10.1177/14759217211060780

Knott, C. E., Kabban, C. S., & Lindgren, E. A. (2024). Probability of Detection for Dependent Observations: The Repeated Measures Method. *IEEE Transactions on Reliability*, 1–14. https://doi.org/10.1109/tr.2024.3478802

Memmolo, V., Moll, J., Moix-Bonet, M., Lugovtsova, Y., Schmidt, D., Krozer, V., & Mueller, I. (2024). Towards reliability assessment of ultra-wideband microwave leakage monitoring in detecting stringer debondings in composite airframes. *Proceedings of EWSHM2024*, *29*(7). https://doi.org/10.58286/29749

Memmolo, V., Moll, J., Schackmann, O., Freitag, S., Volvikova, A., Tschöke, K., Savli, E., Lugovtsova, Y., Moix-Bonet, M., Bayoumi, A., & Mueller, I. (2023). Promoting novel strategies for the reliability assessment of guided wave based SHM systems. *Proceedings of IWSHM2023*.

Moll, J., Kexel, C., Kathol, J., Fritzen, C.-P., Moix-Bonet, M., Willberg, C., Rennoch, M., Koerdt, M., & Herrmann, A. (2020). Guided Waves for Damage Detection in Complex Composite Structures: The Influence of Omega Stringer and Different Reference Damage Size. *Applied Sciences*, *10*(9), 3068. https://doi.org/10.3390/app10093068

Mueller, I., Freitag, S., Memmolo, V., Moix-Bonet, M., Möllenhoff, K., Golub, M., Venkat, R. S., Lugovtsova, Y., Eremin, A., Moll, J., & Tschöke, K. (2022, Juni). Performance Assessment for Artificial Intelligence-Based Data Analysis in Ul-

trasonic Guided Wave-Based Inspection: A Comparison to Classic Path-Based Probability of Detection. In *European Workshop on Structural Health Monitoring* (S. 953–961). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-07258-1_96

Mueller, I., Memmolo, V., Bayoumi, A., Refae, M., & Ricci, F. (2025). Hybrid SHM Sensor Network Feeding Multiple SHM Systems for Monitoring Plate-Like Structures Under Cyclic Fatigue: First Results of a Dataset Under Construction. *International Workshop of Structural Health Monitoring 2025*.

Mueller, I., Memmolo, V., Tschöke, K., Moix-Bonet, M., Möllenhoff, K., Golub, M., Venkat, R. S., Lugovtsova, Y., Eremin, A., & Moll, J. (2022). Performance Assessment for a Guided Wave-Based SHM System Applied to a Stiffened Composite Structure. *Sensors*, *22*(19), 7529. https://doi.org/10.3390/s22197529

Tschoeke, K., Mueller, I., Memmolo, V., Moix-Bonet, M., Moll, J., Lugovtsova, Y., Golub, M., Venkat, R. S., & Schubert, L. (2021). Feasibility of Model-Assisted Probability of Detection Principles for Structural Health Monitoring Systems based on Guided Waves for Fibre-Reinforced Composites. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, 1–1. https://doi.org/10.1109/tuffc.2021.3084898

Tschöke, K., Mueller, I., Memmolo, V., Venkat, R. S., Golub, M., Eremin, A., Moix-Bonet, M., Möllenhoff, K., Lugovtsova, Y., Moll, J., & Freitag, S. (2022, Juni). A Model-Assisted Case Study Using Data from Open Guided Waves to Evaluate the Performance of Guided Wave-Based Structural Health Monitoring Systems. In *European Workshop on Structural Health Monitoring* (S. 937–944). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-07258-1_94

Volovikova, A., Freitag, S., Schackmann, O., Memmolo, V., Bayoumi, A., Mueller, I., & Moll, J. (2024). Artificial Intelligence-Based Approach for Damage Localization in Ultrasonic Guided Wave-Based Structural Health Monitoring. *Research and Review Journal of Nondestructive Testing*, *2*(2). https://doi.org/10.58286/30490

Volvikova, A., Freitag, S., Schackmann, O., Memmolo, V., Bayoumi, A., Mueller, I., & Moll, J. (2024). Artificial Intelligence-Based Approach for Damage Localisation in Ultrasonic Guided Wave-Based Structural Health Monitoring. *Proceedings of EWSHM2024*.

Yilmaz, B., Recoquillay, A., Chapuis, B., & Calmon, P. (2024). A model assisted probability of detection for guided wave SHM systems: comparative study on recent statistical developments. *e-Journal of Nondestructive Testing*, *29*(7). https://doi.org/10.58286/29839